第37卷 第6期
2020年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 37 No. 6
Nov. 2020

基于MOD10A1的祁连山黑河流域典型冰川反照率时空变化研究

王俊瑶， 怀保娟， 王叶堂， 孙维君， 张悟颖

（山东师范大学地理与环境学院，山东 济南 250300）

摘 要：冰川反照率作为影响辐射收支最为敏感的要素，其波动变化将直接影响冰川能量—物质平衡的变化。利用遥感手段研究冰川反照率特征和时空分布规律，对于估算冰川消融乃至下游河川径流具有重要参考依据。本文以MOD10A1逐日反照率产品和Landsat TM/ETM+影像反照率反演结果为主要数据源，用实测数据进行Landsat TM/ETM+反演反照率和MOD10A1产品反照率的误差分析；进而分析黑河流域典型冰川2000—2018年MOD10A1产品反照率的时空变化特征。结果表明，MOD10A1与自动气象站测得的实测反照率差异较大，但两者随时间的变化趋势一致；MOD10A1与Landsat TM/ETM+反演结果差异较小，在黑河流域冰川反照率的研究中具有较好的适用性。在年际尺度上，4条冰川反照率均呈现微弱的下降趋势，空间尺度上，八一冰川年平均反照率最高，羊龙河五号冰川次之，七一冰川次低，十一冰川最低；消融季冰川反照率羊龙河五号冰川最高，七一冰川次之，八一冰川次低，十一冰川最低。

关键词：冰川反照率；黑河流域；MOD10A1；Landsat TM/ETM+；时空分布

冰川反照率作为影响辐射收支最为敏感的要素，控制着大范围内融水产出的时空分布，是冰川消融模拟的关键参数，其波动变化将直接影响冰川能量—物质平衡的变化[1]。冰川反照率对于气候变化极其敏感，在不同的时间与空间上，冰川反照率的差异较大[2]。在全球气候变暖的背景下，监测和计算冰川反照率对于估算冰川消融意义重大[3]。传统的冰川反照率研究多以气象站和地物波谱仪为基础，具有时空尺度受限、观测难度大等局限性[2]。随着遥感技术的不断发展，获得高时空分辨率、长时间序列的冰川反照率数据成为了可能，为冰川反照率研究提供了新的技术手段[4]。

MOD10A1逐日反照率产品具有较高的时空分辨率，国内外学者对该套数据进行了较多的应用和研究。已有研究表明，在格陵兰冰盖地区MODIS逐日反照率产品可以反映一般的季节性变化，且Terra卫星的反演结果略优于Aqua卫星的反演结果[5]。在土耳其山地冰川区，MODIS逐日反照率产品与实地测量结果较为一致（大约高估了10%），同时，在高海拔处的适用性更好[6]。基于MOD10A1逐日反照率产品的较好适用性，可依据该套数据分析单条冰川、甚至大范围冰川区的反照率时空分布特征及变化规律[2,7-8]，还可以利用MOD10A1产品为驱动，重建冰川年净物质平衡[9]。前人对于MOD10A1数据的应用大多着眼于大尺度的区域或针对小尺度某一冰川进行精度验证和时空变化研究，而对于中尺度流域的冰川反照率关注较少。本文以黑河上游典型冰川（七一冰川、羊龙河五号冰川、八一冰川、十一冰川）为研究对象，利用MOD10A1产品研究2000—2018年反照率时空变化特征，以期为定量计算冰川消融提供依据。

1 研究区概况

黑河流域位于祁连山中段北坡（38° ~ 42°N，98° ~ 101°30′E），是我国第二大内陆河[10-11]。根据

收稿日期：2020-01-03； **修订日期：**2020-03-23
项目资助：国家自然科学基金（41701059）；中国博士后科学基金面上资助（2017M612332）
作者简介：王俊瑶（1995-），女，硕士研究生，主要从事冰川消融模拟研究. E-mail: junyao258@outlook.com
通讯作者：怀保娟. E-mail: huaibaojuan@126.com

第二次冰川编目资料,黑河流域共发育有冰川952条,总面积达293.60 km^2[12-14]。

本文选取黑河流域上游的4条典型冰川(图1),自西向东分别为托来山北坡的七一冰川,素珠链峰北坡的羊龙河五号冰川,疏勒山南坡的八一冰川和葫芦沟流域源头的十一冰川[15-18]。4条典型冰川的面积分别为2.53 km^2、5.68 km^2、2.39 km^2和0.50 km^2;海拔高度分别在4323.70 ~ 5114.70 m、4291.10 ~ 5406.70 m、4567.50~4823.70 m和4338.40 ~ 4774.60 m区间内[12-13]。

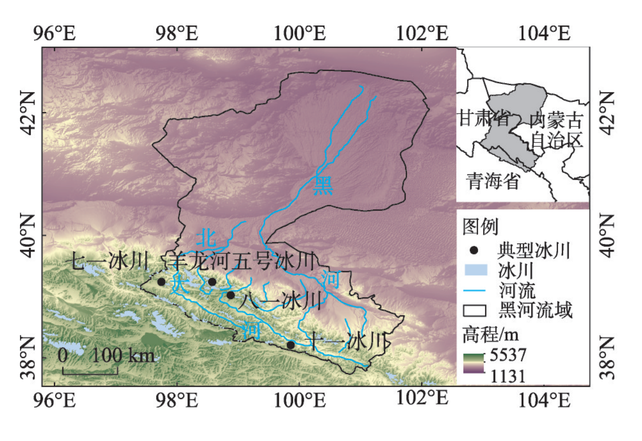


图1 研究区地理位置图

Fig. 1 The location of the four representative glaciers in Heihe River Basin

2 数据及方法

2.1 数据源

2.1.1 MOD10A1反照率产品 MOD10A1是美国航空航天局(NASA)陆地产品组研制的三级逐日积雪数据产品,空间分辨率为500 m。本文从美国雪冰数据中心(NSIDC,https://nsidc.org/)获取了产品编码为h25v05、成像日期为2000年2月到2018年12月的影像数据。

2.1.2 Landsat TM/ETM+遥感影像 Landsat TM/ETM+系列遥感影像来自于美国地质调查局影像数据库中心(USGS,https://earthexplorer.usgs.gov/)。选取与下文介绍气象站实测数据获取日期对应的、云和积雪较少的6景TM/ETM+影像,具体影像信息如表1所示。

2.1.3 反照率实测资料 七一冰川自动气象台站实测反照率数据来自前人研究[15,19],获取了2006年8月1日、8月25日、9月18日,2007年8月12日、9月13日、9月21日共6日的数据作为验证数据,七一冰川自动气象站(97°45.2′E,39°14.7′N,海拔4473 m,坡度10°)配设有CNR1净辐射表,安装高度为1.5 m,且与水平面保持平行。

表1 Landsat TM/ETM+影像信息

Tab. 1 Information of Landsat TM/ETM+ images

获取时间	行列号	传感器	空间分辨率/m
2006-08-01	135/033	TM	30
2006-09-18	135/033	TM	30
2007-09-21	135/033	TM	30
2006-08-25	135/033	ETM+	30
2007-08-12	135/033	ETM+	30
2007-09-13	135/033	ETM+	30

十一冰川反照率实测数据来自于HandHeld™an地物波谱仪实际测量,仪器观测波长精度为+/-1 nm@700 nm。本研究所用数据测量时间为2013年8月13日—8月31日每天的上午9:00至下午13:00,天气状况为晴空、光照条件稳定;测量地点为十一冰川消融区花杆点处,测量时探头与冰面距离为1.3 m,测量时每10 ~ 15 min对参考白板进行优化,利用标准太阳入射辐射光谱计算的方法将ASD观测的反射光谱转换为反照率。由于对应时间段内MOD10A1产品反照率有效值缺失,所以该数据用于与测量日期前后的MOD10A1产品反照率进行对比分析。

2.1.4 气象再分析资料 ERA-Interim再分析资料来自欧洲中期数值预报中心(ECMWF,https://www.ecmwf.int/),本文选取2000—2018年0.75°分辨率的月平均气温、总降水和降雪数据。HAR(The High Asia Refined analysis)来自柏林工业大学(https://www.klima.tu-berlin.de/),本文选取2002年云量因子日均值数据。

2.1.5 DEM 数字高程模型(DEM)是美国航空航天局(NASA)和美国国防部国家测绘局(NIMA)等多部门共同测量的SRTM v4.1,该数据获取自地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/),用来辅助Landsat TM/ETM+数据的地形校正分析。

2.2 方法

本文利用实测数据进行Landsat TM/ETM+反演反照率和MOD10A1产品反照率的误差分析,批量提取MOD10A1产品在冰川区内有效值进行反照率日均值的计算,并分析2000—2018年黑河流域典型

冰川反照率的时空分布特征,技术路线如图2所示。

2.2.1 MOD10A1反照率产品处理 MOD10A1反照率数据层中积雪反照率的数值介于0～100(表2)。MOD10A1原始产品进行格式及投影转换,并依据第二次冰川编目数据掩膜提取冰川区MOD10A1产品像元值后,进行有效值提取和计算。

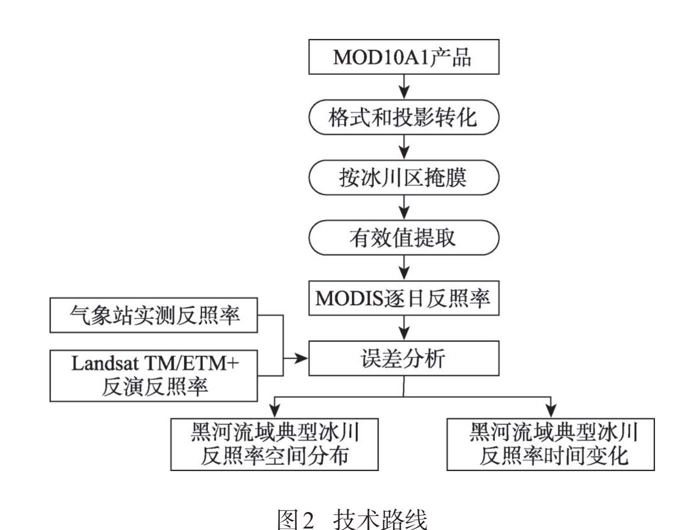


图2 技术路线

Fig. 2 Technical chart

表2 MOD10A1产品中像元值的含义

Tab. 2 Meaning of the pixel value of MOD10A1

像元值	含义	像元值	含义
0～100	积雪反照率	150	云层覆盖
101	不确定的地物类型	251	自身阴影
111	夜间	252	陆地界限不匹配
125	无积雪覆盖的陆地	253	BRDF无效
137	内流湖	254	没有匹配的数据
139	开阔水体	250	缺失的数值

2.2.2 Landsat TM/ETM+反照率反演算法

(1)辐射定标

按照遥感影像头文件说明,将影像的原始DN值转换为具有物理意义的大气顶部辐射亮度值L ($W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$),辐射定标公式为:

$$L = \alpha \cdot DN + \beta \tag{1}$$

$$\alpha = \frac{L_{max} - L_{min}}{255} \tag{2}$$

$$\beta = L_{min} \tag{3}$$

式中:α、β分别表示辐射定标系数中增益、偏移量,L_{max}和L_{min}分别为辐射亮度值的动态变化范围。

(2)地形校正

山区由于地形复杂,受到遮蔽作用的影响,阴阳坡冰雪地物在影像中的辐射亮度产生明显差异。因此必须通过地形校正减少山区地形遮蔽作用对影像辐射亮度的影响,提高反演地表反射率精度[20]。本文使用ENVI Topographic Correction工具选择SCS+C模型进行地形校正,此模型引入半经验的C系数来说明散射辐射,对SCS模型进行改进[21],具有调节过度校正的作用[22]。

(3)大气校正

电磁波在穿过大气层时会受到大气衰弱的影响,造成遥感反演反射率的误差[7]。需要使用大气校正来消除影响,将大气层顶部的辐射量转换为反映地物真实信息的地表反射率。本文选用FLAASH模型进行大气校正,输入参数如表3所示。

(4)各向异性校正

由于地表反照率是各观测角的反射率的积分,而卫星仅在某一个或几个角度进行观测,因而必须应用BRDF模型进行各向异性校正以减小反射率差异[23]。本研究采用C因子法BRDF校正,此方法利用全球MODIS BRDF产品中约155亿像元值拟合得到的BRDF模型进行校正[24]。

(5)窄波段反射率转化为宽波段反照率

由于卫星遥感测量的是窄波段不连续的反射率,必须将各个窄波段的光谱反射率转化为宽波段反照率。本文采用Liang等[25]提出的窄波段转宽波段的转化公式:

$$a = 0.443a_1 + 0.317a_2 + 0.240a_3 \tag{4}$$

式中:a表示反照率反演值,a_1,a_2,a_3分别表示第1、2、3波段反射率。

表3 FLAASH大气校正输入参数(以20060825ETM+数据为例)

Tab. 3 Parameters required input into FLAASH for atmospheric correction (taken 20060825 ETM+ data as an example)

影像中心点	传感器类型	飞行日期	海拔高度/km	像元大小	大气模式	气溶胶模式
38°54′43.79″N 97°40′26.39″E	Landsat ETM+	2006-08-25	4.773	30 m×30 m	MLS	乡村

初始能见度/km	气溶胶scale高度/km	CO_2混合比例/ppm	MODTRAN分辨率/cm^{-1}	散射模型	DISCORT流量
33	1.25	370	15	scale DISCORT	8

2.2.3 误差分析 黑河流域的典型冰川受复杂地形和风吹雪的影响,空间异质性较大[26]。自动气象站测定的有效视野为10 m×10 m左右,而MOD10A1反照率产品的空间分辨率为500 m×500 m,两者观测视野间的差距较大,必然会导致冰川反照率的差异[8]。因而,在进行误差分析时,必须要考虑空间尺度效应对结果的影响。本文采用Liang提出的利用高空间分辨率数据产品,将地面实测数据升尺度到MODIS空间尺度进行误差分析[27]。

精度验证主要根据实测的反照率将Landsat TM/ETM+反演反照率瞬时值转换为日值,并对转换后的Landsat TM/ETM+影像建立17×17像元的滑动平均窗口,使其空间分辨率上升到510 m×510 m,再对其重采样至500 m×500 m,并与MOD10A1反照率产品进行空间配准。通过得到的Landsat TM/ETM+反演反照率结果对MOD10A1反照率产品进行逐像元精度验证。评价指标包括相关系数(Correlation Coefficient,*r*)、绝对误差(Absolute Error,AE)、平均绝对误差(Mean Absolute Error,MAE)和均方根误差(Root Mean Square Error,RMSE)。

3 结果与分析

3.1 MODIS反照率产品在黑河流域典型冰川的误差分析

对MOD10A1反照率产品提取结果与七一冰川表面自动气象站测得的实测反照率直接进行对比(图3)。MOD10A1反照率产品提取结果与七一冰川表面自动气象站测得的实测反照率绝对误差(*AE*)在-0.26~0.08之间,平均绝对误差(MAE)为-0.09,均方根误差(RMSE)为0.15,两者随时间的变化趋势较为一致。BRDF模型的误差、混合像元和云覆盖等原因是MOD10A1产品出现误差的主要原因[27]。

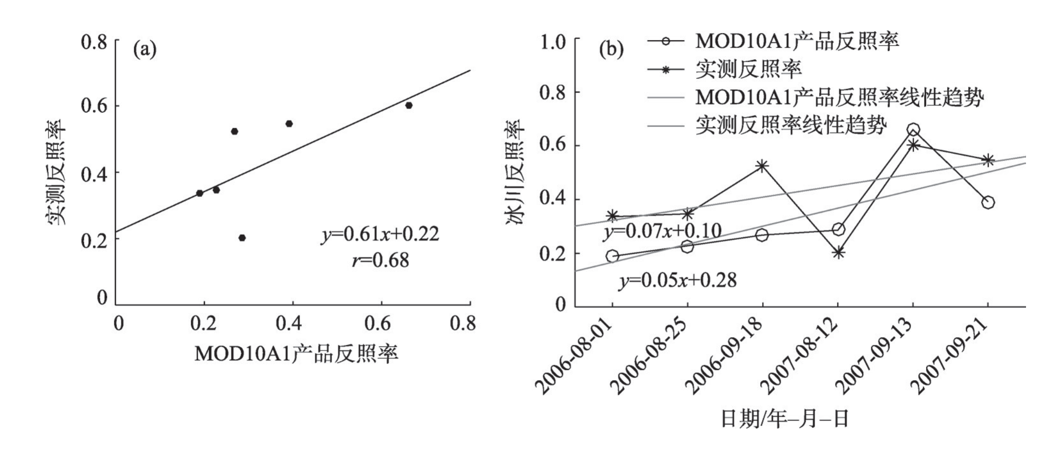


图3 MOD10A1产品反照率与实测反照率比较

Fig. 3 Comparison of MOD10A1 glacier albedo and ground measured albedo

进而利用Liang提出的方案,用Landsat TM/ETM+影像反演反照率对MOD10A1反照率产品进行误差分析。根据气象站的日反照率数据与其对应日期的Landsat TM/ETM+影像反演出的瞬时反照率数据进行线性回归分析,计算七一冰川单条冰川的日反照率值(图4)。

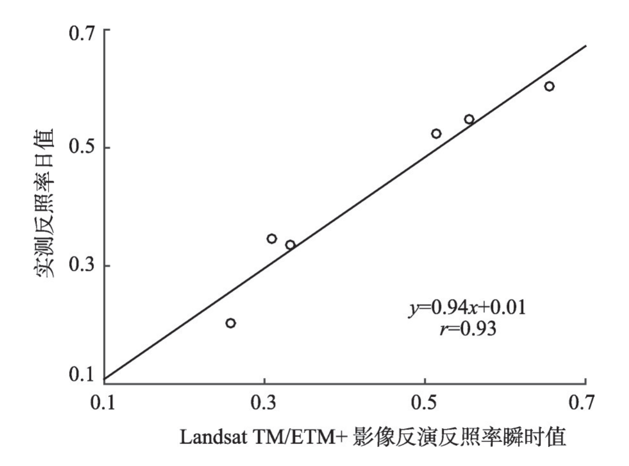


图4 Landsat TM/ETM+反演反照率瞬时值与冰川表面实测反照率日值的散点关系

Fig. 4 The scatter relationship between Landsat TM/ETM+ derived albedo and ground measured albedo

以MOD10A1反照率产品在七一冰川的适用性来代表该产品在黑河流域4条典型冰川的适用性。Landsat反演反照率与MOD10A1产品反照率的对比结果表明,两者绝对误差(AE)在-0.06 ~ 0.09之间,平均绝对误差(MAE)为0.01,均方根误差(RMSE)为0.05。表明该产品在黑河流域具有较好的适用性(图5)。

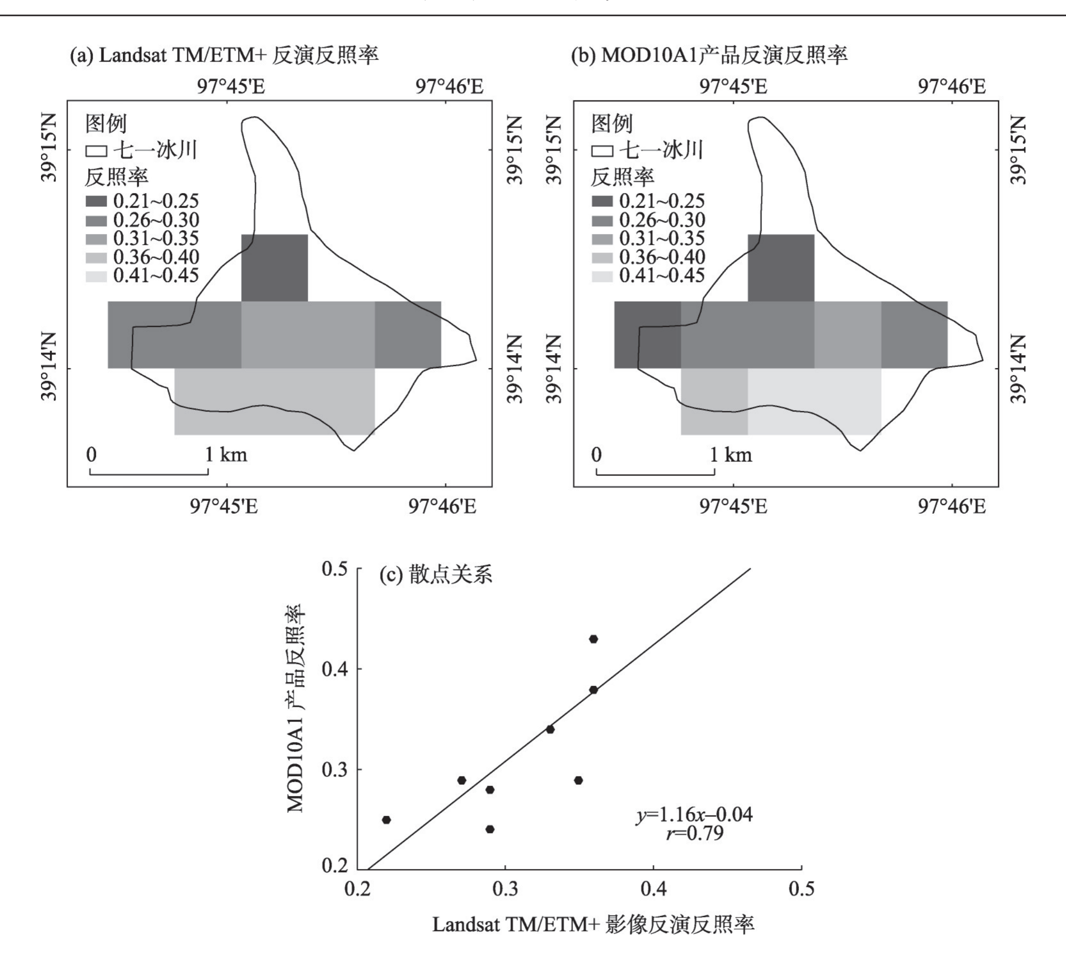


图5 Landsat TM/ETM+影像反照率空间尺度转换结果与MOD10A1产品反照率

Fig. 5 Albedo derived from Landsat TM/ETM+ images and MOD10A1 albedo product

3.2 黑河流域典型冰川反照率时间变化特征

分析MOD10A1产品反照率的年内变化结果(图6),八一冰川反照率在3月有小幅上升,5月后迅速下降在8月达到最低值,随后大幅度增大并于11月到达最高值,12月至来年3月反照率呈微弱减少的趋势。4—5月可能由于降雪频率有所增加,冰川表面反照率有小幅度上升;6—8月,冰雪消融作用最强,反照率在此时最低;9—11月,随着冰川消融作用减弱,反照率不断升高,并达到峰值。

黑河流域4条典型冰川反照率随时间变化趋势较为一致(图7),最低值均出现在2013年;七一冰川、羊龙河五号冰川和八一冰川最大值均出现在2008年,虽然十一冰川反照率最大值出现在2003年,但2008年冰川反照率是次高峰,且与最大值的差异较小。4条典型冰川反照率在2000—2018年均呈现微弱的下降趋势,年均下降速率分别为-0.0004、-0.002、-0.0004和-0.0008,其中,羊龙河五号冰川反照率下降速度最快,十一冰川反照率下降速率次之。4条冰川均未通过95%的置信度检验,说明4条

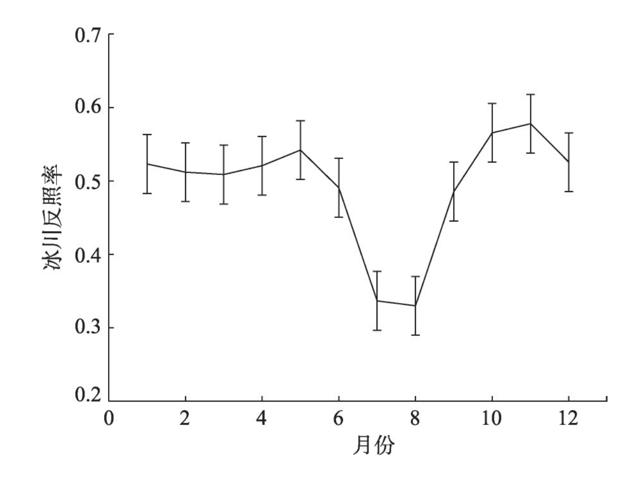


图6 2000—2018年八一冰川多年平均反照率逐月变化

Fig. 6 Monthly variations of albedo on the Bayi Glacier from 2000 to 2018

冰川年平均反照率的下降趋势不显著。而根据ERA-Interim提取的总降水和降雪数据,年均固态降水与液态降水比例下降速率分别为-0.01、-0.02、-0.01和-0.02。羊龙河五号冰川和十一冰川年均降水固液比下降速度最快,这可能是导致这两

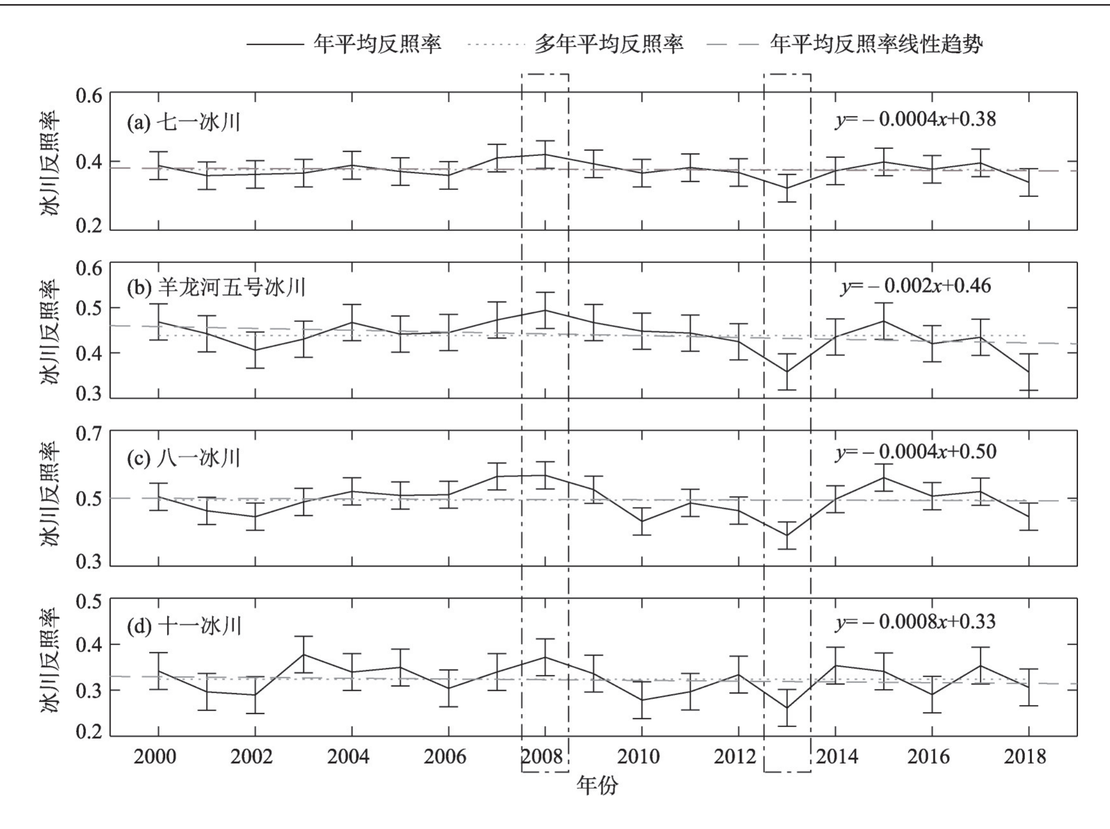


图7　黑河流域4条典型冰川反照率的年际变化(MOD10A1)

Fig. 7　Annual variations of albedo on the four representative glaciers in Heihe River Basin (MOD10A1)

个冰川反照率下降速率最快的原因。

3.3　黑河流域典型冰川反照率空间变化特征

为了反映黑河流域典型冰川反照率的空间变化特征,本文依据二次冰川编目的冰川中值面积高度,提取对应高度线作为划分冰川区上部和下部的依据。

以2008年8月14日羊龙河五号冰川、八一冰川的反照率空间分布为例(图8),两条冰川均表现出冰川区下部反照率低于上部反照率的特征,但八一冰川下部反照率与上部反照率空间差异较小。

已有研究表明,每年7—8月为黑河流域典型冰川的消融旺季[28],4条冰川多年反照率均值及消融旺季反照率均值如图9所示。年平均反照率八一冰

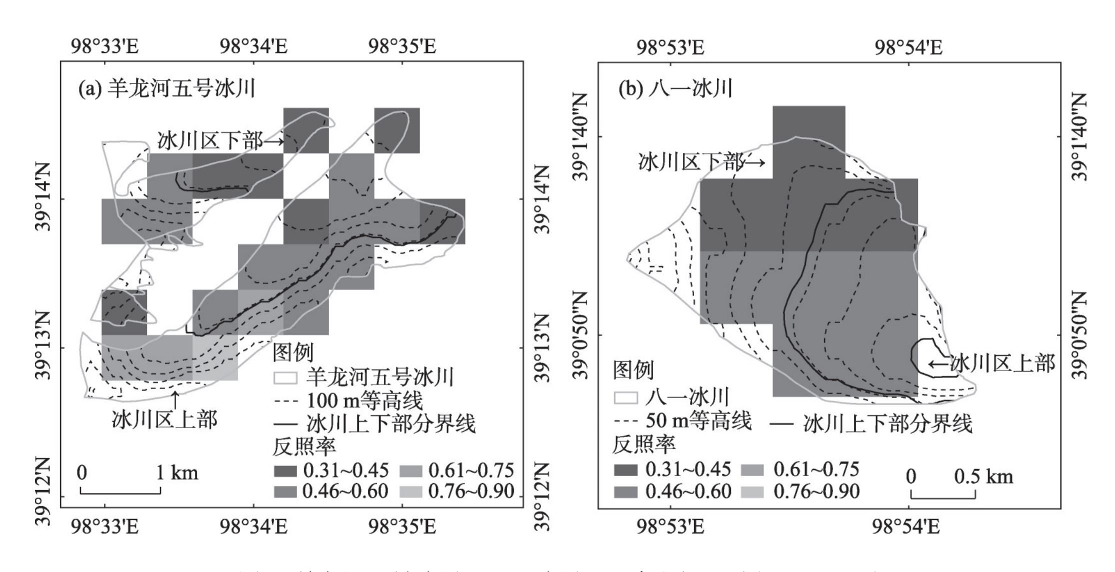


图8　羊龙河五号冰川和八一冰川反照率空间差异(MOD10A1)

Fig. 8　The spatial difference of albedo on Yanglonghe glacier No. 5 and Bayi Glacier (MOD10A1)

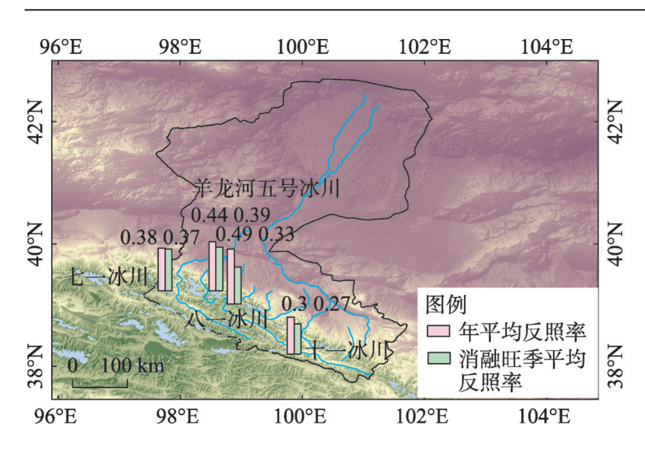


图9 黑河流域4条典型冰川反照率值空间分布(MOD10A1)

Fig. 9 Spatial distribution of albedo on the four representative glaciers in Heihe River Basin (MOD10A1)

川最高、羊龙河五号冰川次之、七一冰川次低、十一冰川最低;消融旺季冰川反照率羊龙河五号冰川最高、七一冰川次之、八一冰川次低、十一冰川最低,消融旺季4条冰川反照率基本呈现随海拔上升而上升的特征,但整个流域是否存在同样的冰川反照率随着海拔高度而变化的规律需在日后的研究中加以探讨。

4 讨 论

4.1 云量对于冰川反照率的影响

大气中的云量是影响反照率的重要因素[29],本文判定云量小于0.3时为晴天,大于0.8时为阴天,介于两者之间为多云[30]。2002年不同云量因子下4条冰川反照率变化如表4所示,阴天时冰川反照率会比晴天时有所增加。主要原因是云对于近红外波段的辐射吸收较强,阴天云吸收了较多的近红外波段辐射,到达冰川表面的可见光波段占整个太阳入射短波中的比例增大。同时冰川表面对于可见光波段辐射的反照率最高,因而阴天下冰川反照率

表4 不同云量因子下反照率变化

Tab. 4 Albedo variations under different cloud cover factors

冰川名称	晴天下冰川反照率	阴天下冰川反照率
七一冰川	0.35	0.36
羊龙河五号冰川	0.39	0.50
八一冰川	0.45	0.48
十一冰川	0.31	0.41
平均值	0.38	0.44

增加,而且辐射在云底和冰川表面之间多次反射也会加剧冰川反照率的增加效应[31]。

4.2 气候因子对冰川反照率的影响

降水类型和气温变化是影响冰川反照率变化的重要影响因素[32]。根据ERA-Interim再分析资料计算的数据显示,黑河流域4条典型冰川2000—2018年4条冰川年平均气温呈微弱上升趋势、年平均固液比均呈微弱的下降趋势,气温趋势与反照率变化趋势呈负相关(相关系数r分别为-0.37、-0.17、-0.38和-0.66)、固液比趋势与反照率变化趋势呈正相关(相关系数r分别为0.22、0.19、0.23和0.12)。不同时间段内,消融季气温和固液比对于反照率的影响程度不尽相同,可能与其他原因相关,如冰川反照率与积雪密度和积雪污化物颗粒浓度大致呈反相关的线性关系[33],年平均气温、年总降水量、黑碳、粉尘沉积状况等也不同程度的影响着冰川反照率。

5 结 论

通过对Landsat TM/ETM+影像和2000—2018年MOD10A1产品提供的反照率数据进行分析,研究了黑河流域4条典型冰川反照率的时空分布和变化特征,得出以下结论:

(1) MOD10A1反照率产品提取结果与七一冰川表面自动气象站实测的反照率随时间的变化趋势一致,绝对误差(AE)在-0.26 ~ 0.08之间,平均绝对误差(MAE)为-0.09,均方根误差(RMSE)为0.15。MOD10A1反照率产品与Landsat TM/ETM+影像反演反照率值差异较小,绝对误差(AE)在-0.06 ~ 0.09之间,平均绝对误差(MAE)为0.01,均方根误差(RMSE)为0.05,证明MOD10A1反照率产品在黑河流域具有较好的适用性。

(2) 黑河流域4条典型冰川反照率随时间变化较为一致,最低值均出现在2013年;七一冰川、羊龙河五号冰川和八一冰川最大值均出现在2008年,虽然十一冰川反照率最大值出现在2003年,但2008年冰川反照率是次高峰,且与最大值的差异较小。4条典型冰川反照率在2000—2018年均呈微弱的下降趋势。

(3) 羊龙河五号冰川和八一冰川2条冰川均呈冰川区上部冰川反照率高于下部反照率的特征,八

一冰川上下部反照率空间差异较小。

(4)年平均冰川反照率八一冰川最高,羊龙河五号冰川次之,七一冰川次低,十一冰川最低;消融季冰川反照率羊龙河五号冰川最高,七一冰川次之,八一冰川次低,十一冰川最低。

参考文献(References):

[1] Malmros J K, Mernild S H, Wilson R, et al. Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016)[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 209: 240–252.

[2] 毛瑞娟, 吴红波, 贺建桥, 等. 昆仑山木孜塔格冰川反照率变化特征及其与粉尘的关系[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1133–1142. [Mao Ruijuan, Wu Hongbo, He Jianqiao, et al. Spatiotemporal variation of albedo of Muztagh Glacier in the Kunlun Mountains and its relation to dust[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1133–1142.]

[3] 李开明, 陈世峰, 康玲芬, 等. 中国大陆型冰川和海洋型冰川变化比较分析——以天山乌鲁木齐河源1号冰川和玉龙雪山白水河1号冰川为例[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 12–19. [Li Kaiming, Chen Shifeng, Kang Lingfen, et al. Variation of continental glacier and temperate glacier in China: A case study of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River and Baishui Glacier No. 1[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 12–19.]

[4] Davaze L, Rabatel A, Yves A, et al. Monitoring glacier albedo as a proxy to derive summer and annual surface mass balances from optical remote-sensing data[J]. The Cryosphere, 2018, 12(1): 271–286.

[5] Stroece J C, Box J E, Haran T. Evaluation of the MODIS (MOD10A1) daily snow albedo product over the Greenland ice sheet[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 105(2): 155–171.

[6] Tekeli A E, Şensoy A, Şorman A, et al. Accuracy assessment of MODIS daily snow albedo retrievals with in situ measurements in Karasu basin, Turkey[J]. Hydrological Processes: An International Journal, 2006, 20(4): 705–721.

[7] 王杰, 何晓波, 叶柏生, 等. 唐古拉山冬克玛底冰川反照率变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 21–28. [Wang Jie, He Xiaobo, Ye Baisheng, et al. Variations of albedo on the Dongkemadi Glacier, Tanggula Range[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(1): 21–28.]

[8] 徐田利, 邬光剑, 张学磊, 等. 基于MODIS数据的青藏高原冰川反照率时空分布及变化研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(5): 875–883. [Xu Tianli, Wu Guangjian, Zhang Xuelei, et al. Albedo on glaciers in the Tibetan Plateau based on MODIS data: Spatiotemporal distribution and variation[J]. Journal of Glaciology and Geocrylogy, 2018, 40(5): 875–883.]

[9] Zhang Z, Jiang L, Liu L, et al. Annual glacier–wide mass balance (2000– 2016) of the interior Tibetan Plateau reconstructed from MODIS albedo products[J]. Remote Sensing, 2018, 10(7): 1031–1052.

[10] 郭力仁, 蒙吉军, 李枫. 基于空间异质性的黑河中游水资源脆弱性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(9): 175–182. [Guo Liren, Meng Jijun, Li Feng. Water resources vulnerability in the middle reaches of Heihe River based on spatial heterogeneity[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(9): 175–182.]

[11] 怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 近50年黑河流域的冰川变化遥感分析[J]. 地理学报, 2014, 69(3): 365– 377. [Huai Baojuan, Li Zhongqin, Sun Meiping, et al. RS analysis of glaciers change in the Heihe River Basin in the last 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(3): 365–377.]

[12] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3–16. [Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 70(1): 3–16.]

[13] Guo W, Liu S, Xu J, et al. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results[J]. Journal of Glaciology, 2015, 61 (226): 357–372.

[14] Sun M, Liu S, Yao X, et al. Glacier changes in the past half–century: Based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(2): 206–220.

[15] 毛瑞娟, 蒋熹, 郭忠明, 等. 基于TM/ETM+影像反演祁连山七一冰川反照率精度比较研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 301–309. [Mao Ruijuan, Jiang Xi, Guo Zhongming, et al. Study of the inversion precision of albedo on the Qiyi Glacier in the Qilian Mountain based on TM/ETM+ image[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 301–309.]

[16] Shangguan D, Liu S Ding Y, et al. Changes in the elevation and extent of two glaciers along the Yanglonghe river, Qilian Shan, China [J]. Journal of Glaciology, 2010, 56(196): 309–317.

[17] 王宁练, 蒲健辰. 祁连山八一冰川雷达测厚与冰储量分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 431–435. [Wang Ninglian, Pu Jianchen. Ice thickness, sounded by ground penetrating radar, on the Bayi Glacier in the Qilian Mountains, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(3): 431–435.]

[18] 卿文武, 刘俊峰, 杨钰泉, 等. 基于气温的物质平衡模型的参数不确定性分析——以祁连山十一冰川为例[J]. 地球科学进展, 2016, 31(9): 937–945. [Qing Wenwu, Liu Junfeng, Yang Yuquan, et al. Uncertainty analysis of the parameters of the temperature–index method: A case study of Shiyi Glacier in Qilian Mountains[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(9): 937–945.]

[19] 王杰. 中国西部典型冰川反照率变化特征与参数化模拟[D]. 北京:中国科学院大学, 2012. [Wang Jie. The Spatiotemporal Variations and Parameterizations of Albedo on Nine Representative Glaciers in Western China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2012.]

[20] 吕利利, 颉耀文, 董龙龙. 基于不同地形校正模型的影像反射率

对比分析[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(4): 751−759. [Lyu Lili, Xie Yaowen, Dong Longlong. The comparison of reflectance based on different terrain correction[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(4): 751−759.]

[21] Soenen S A, Peddle D R, Coburn C A. SCS+C: A modified sun-canopy-sensor topographic correction in forested terrain[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(9): 2148−2159.

[22] 钟耀武, 刘良云, 王纪华, 等. SCS+C地形辐射校正模型的应用分析研究[J]. 国土资源遥感, 2006, 70(4): 14−18. [Zhong Yaowu, Liu Liangyun, Wang Jihua, et al. The appllication of SCS+C methods for topographic radiation correction[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2006, 70(4): 14−18.]

[23] 王介民, 高峰. 关于地表反照率遥感反演的几个问题[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(5): 295−300. [Wang Jiemin, Gao Feng, Discussion on the problems on land surface albedo retrieval by remote sensing data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(5): 295−300.]

[24] Roy D P, Zhang Hankun, Ju Junchang, et al. A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 176: 255−271.

[25] Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76 (2): 213−238.

[26] 潘海珠, 王建, 李弘毅. 祁连山区MODIS积雪反照率产品的精度验证及云下积雪反照率估算研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 49−57. [Pan Haizhu, Wang Jian, Li Hongyi. Accuracy validation of the MODIS snow albedo products and estimate of the snow albedo under cloud over the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 49−57.]

[27] Liang S, Fang H, Chen M, et al. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: methods and preliminary results[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1−2): 149−162.

[28] 王坤, 井哲帆, 吴玉伟, 等. 祁连山七一冰川表面运动特征最新观测研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 537−545. [Wang Kun, Jing Zhefan, Wu Yuwei, et al. Latest survey and study of surface flow features of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 537−545.]

[29] 蒋熹. 冰雪反照率研究进展[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 728−738. [Jiang Xi. Progress in the research of snow and ice albedo[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(5): 728−738.]

[30] 张一平, 李佑荣, 王进欣, 等. 低纬高原城市冬季南北朝向室内温湿特征的初步分析[J]. 热带气象学报, 2001, 17(3): 265−272. [Zhang Yiping, Li Yourong, Wang Jinxin, et al. The characteristics of indoor air temperature and humidity of south and north side of city buildings in winter on low-latitude plateau[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2001, 17(3): 265−272.]

[31] Greuell W, Knap W H, Smeets P C. Elevational changes in meteorological variables along a midlatitude glacier during summer[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D22): 25941−25954.

[32] 周石硚, 康世昌, 高坛光, 等. 纳木错流域扎当冰川径流对气温和降水形态变化的响应[J]. 科学通报, 2010, 55(18): 1781−1788. [Zhou Shiqiao, Kang Shichang, Gao Tanguang, et al. Response of Zhadang Glacier runoff in Nam Co Basin, Tibet, to changes in air temperature and precipitation form[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(18): 1781−1788.]

[33] 蒋熹, 王宁练, 蒲健辰, 等. 夏季消融期祁连山“七一”冰川反照率初步研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 752−760. [Jiang Xi, Wang Ninglian, Pu Jianchen, et al. The albedo on the Qiyi Glacier in Qilian Mountains during the ablation period[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 752−760.]

Spatiotemporal variation of albedo of four representative glaciers in the Heihe River Basin based on multi-source data

WANG Jun-yao, HUAI Bao-juan, WANG Ye-tang, SUN Wei-jun, ZHANG Wu-ying
(*College of Geography and Environment*, *Shandong Normal University*, *Jinan* 250300, *Shandong*, *China*)

Abstract: Glacier albedo is a critical parameter that controls the process of radiation budget, the fluctuation of which directly affects the change in glacier energy−mass balance. By remote sensing, studies on the characteristics of glacier albedo and its spatiotemporal distribution can be taken as an important reference for estimating glacier melting and downstream river runoff. In this study, albedo dataset retrieved from Landsat TM/ETM+ images and MOD10A1 daily albedo product were used as the main data sources, and Landsat TM/ETM+ images and MOD10A1 data' error were analyzed by field measurements. Then, the spatiotemporal variations of albedo were investigated on four representative glaciers in Heihe River Basin of MOD10A1 from 2000 to 2018. The results showed that there was a certain bias between albedo value derived from MOD10A1 products and ground measured, but the time series was similar; there is a difference in inversion results between MOD10A1 and Landsat TM/ETM+, suggesting a good applicability of glacier albedo in Heihe River Basin. On the interannual scale, the albedo of four glaciers was decreasing. Among the spatial scale, the annual average albedo of Bayi glacier was the highest, followed by Yanglonghe glacier No. 5, Qiyi glacier, and Shiyi glacier; the average albedo of Yanglonghe glacier No. 5 was the highest in the ablation season, followed by the Qiyi glacier, Bayi glacier, and Shiyi glacier.

Keywords: glacier albedo; Heihe River Basin; MOD10A1; Landsat TM/ETM+; temporal and spatial variation